

Jon Peter Wehrlin

Bundesamt für Sport, Eidgenössische Hochschule für Sport, Magglingen

«Live high – train low»: Ein erfolgreiches Höhentrainingsparadigma zur Leistungssteigerung bei Eliteausdauerathleten?

Zusammenfassung

Während der Nutzen der Höhenakklimatisation für eine verbesserte Ausdauerleistungsfähigkeit in der Höhe gut dokumentiert ist, wird die Höhentrainingsmethode «oben schlafen – oben trainieren» («live high – train high»; LHTH) als Vorbereitung für Wettkämpfe im Flachland kontrovers diskutiert. Eine optimierte Variante stellt «oben schlafen – unten trainieren» («live high – train low»; LHTL) dar. LHTL versucht auf der einen Seite, den Vorteil der positiven Höhenakklimatisationseffekte durch das «Live high» beizubehalten (vor allem die Zunahme des Erythrozytenvolumens und der Hämoglobinmasse), während auf der anderen Seite der Nachteil (hauptsächlich die reduzierte absolute Trainingsintensität in der Höhe) möglichst minimiert werden soll. Dieses Höhentrainingsparadigma hat sich bei Eliteausdauerathleten in der Vorbereitung für Wettkämpfe im Flachland als vorteilhaft gegenüber von LHTH und normalem Training im Flachland erwiesen. Mögliche erfolgsmindernde Faktoren sind: 1) eine ungenügende «hypoxische Dosis» des LHTL (empfohlen ist ein Aufenthalt von 3–4 Wochen mit mindestens 400 Std. auf einer Höhe von ca. 2300–2600 m); 2) ein inadäquater Trainingsstimulus während des LHTL (Unter- oder Übertrainingssymptome); 3) Probleme mit dem «Timing» des Wettkampfes und dem Training nach dem Höhengaufenthalt; 4) medizinische Probleme (Atemwegserkrankungen, Infektionen, Höhenkrankheit usw.); 5) eine individuell schwache «Akklimationresponse» an die Höhe. Wenn LHTL sorgfältig durchgeführt wird, bietet diese Höhentrainingsmethode auch als Vorbereitung für Wettkämpfe im Flachland ein zusätzliches Potential zur Leistungssteigerung bei Eliteausdauerathleten.

Abstract

The benefits of altitude acclimatization in enhancing performance at altitude are well documented. The impact of living and training at altitude (LHTH) in order to enhance endurance performance at sea level remain equivocal. To optimise the use of altitude prior to a sea level competition, the concept of live high – train low (LHTL) has been developed. LHTL attempts to maintain the advantages of altitude acclimatization (most notably an increased erythrocyte volume and haemoglobin mass) through living at an optimal (moderate) altitude and to minimize the disadvantages (namely the reduction in absolute training intensity at altitude) by training at lower altitudes. This LHTL paradigm has been found to be superior to LHTH and training at sea level in preparation of even highly trained athletes for competitions at sea level. Plausible reasons for diminished or negative effects with LHTL include: 1) an inadequate hypoxic dose (research suggests living 3–4 weeks with a minimum of 400 hours between 2300 and 2600 m respectively); 2) an inadequate training stimulus (resulting in detraining or overtraining symptoms); 3) difficulties in optimising training and competition schedules on arrival from altitude; 4) medical problems (respiratory illness, infections, acute mountain sickness, etc.); 5) an individual's poor response to the altitude acclimatization effects. Nevertheless, when carefully implemented, LHTL promotes further improvement in even highly trained endurance athlete's performance also at sea level.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 53 (2), 68–75, 2005

Einleitung

In den letzten 20–30 Jahren haben sich die Leistungen der Weltrekorde in Ausdauersportarten und -disziplinen verbessert, und die maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2\text{max}$) der Ausdauerathleten ist gestiegen. Viele der Rekorde sind durch Athleten aufgestellt worden, welche sich in Höhenlagen auf diese Wettkämpfe vorbereitet haben oder sogar in diesen Höhenlagen wie z.B. in Kenia oder Äthiopien leben [80]. Klassischerweise wurde Höhentrainings nach der Methode «oben schlafen – oben trainieren» («live high – train high»; LHTH) durchgeführt. Es ist in der wissenschaftlichen Literatur praktisch unbestritten, dass sich diese Methode eignet, um den Sportler an die Wettkampfhöhe zu akklimatisieren und damit auf die Wettkämpfe, welche in Höhenlagen stattfinden, vorzubereiten [1, 12, 16, 20, 39, 73, 58, 60, 80]. Die Diskussion unter Athleten, Trainern und Wissenschaftlern wurde in den letzten 30

Jahren vielmehr über Risiken und Nutzen einer Höhentrainingsvorbereitung für Wettkämpfe im Flachland geführt. Die wissenschaftliche Literatur hierüber ist mehrdeutig, es gibt Studien mit erhöhter Leistungsfähigkeit nach dem LHTH im Flachland [9, 12, 16, 27, 51, 71], aber auch Studien ohne verbesserte Leistungsfähigkeit [1, 4, 10, 19, 20, 37, 39, 45, 69, 70, 73]. Im Versuch, die Methode LHTH als Vorbereitung für Wettkämpfe im Flachland zu optimieren, haben Levine & Stray-Gundersen [46, 47] 1991 die Höhentrainingsmethode «oben schlafen – unten trainieren» («live high – train low»; LHTL) erstmals vorgestellt. Vereinfacht gesagt basiert das Konzept dieser Methode darauf, dass auf der einen Seite die Vorteile der Akklimationseffekte an die Höhe durch das «Live high» möglichst beibehalten werden (vor allem die Zunahme des Erythrozytenvolumens und der Hämoglobinmasse) und auf der anderen Seite die Nachteile des «Train high» (vor allem die mit der Höhe assoziierte Reduktion der absoluten Trainingsintensi-

tät) möglichst minimiert werden. In einer sorgfältig kontrollierten Studie zeigten Levine & Stray-Gundersen 1997 die Vorteile von LHTL bezüglich der Leistungsfähigkeit im Flachland gegenüber LHTH und normalem Training auf Meereshöhe auf [45]. In der Folge sind die Effekte von LHTL auf verschiedene physiologische Parameter und die Leistungsfähigkeit in vielen Studien mit unterschiedlichen Resultaten unter natürlichen als auch künstlichen Höhenbedingungen untersucht worden und LHTL wird in den meisten aktuellen Übersichtsarbeiten [24, 43, 58, 60, 61, 80] als die erfolgversprechendste Variante des Höhentrainings für Eliteathleten in der Vorbereitung auf Wettkämpfe im Flachland gewertet. Ziel dieses Übersichtsartikels ist es deshalb, die wissenschaftliche Evidenz der leistungsfördernden als auch leistungshemmenden physiologischen Effekte der Methode «Living high – training low» (LHTL) zu geben. Weiter werden die Leistungsveränderungen in Studien mit Eliteausdauerathleten nach LHTL präsentiert, sowie praktische Empfehlung für die Durchführung eines LHTL-Höhentrainingslagers gemacht.

Der Akklimatisationseffekt des «Live high» auf das Blut

Effekt auf das Erythrozytenvolumen und die Hämoglobinmasse

In Ausdauerathleten übersteigt die Kapazität der Muskeln, Sauerstoff zu verarbeiten, die Kapazität des Herzkreislaufsystems, Sauerstoff zu transportieren [74]. Der relevanteste Akklimatisationseffekt des «Live high» ist die allgemein angenommene Zunahme des Erythrozytenvolumens (EV) und der Hämoglobinmasse (Hb_{masse}). Diese Zunahme führt durch den verbesserten Sauerstofftransport sowohl in der Höhe als auch im Flachland zu einer erhöhten maximalen Sauerstoffaufnahme ($VO_{2\text{max}}$) und zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit [43]. Die positiven Effekte einer alleinigen Zunahme der Hb_{masse} und des EV auf die Ausdauerleistungsfähigkeit wurden in mehreren Studien mit Ausdauerathleten gezeigt [5, 6, 18, 42].

Die Relevanz wird zudem durch die Tatsache verdeutlicht, dass die meisten Dopingfälle im Ausdauersport Blutdopingfälle sind [42].

Bei einer Höhenexposition sinkt der Sauerstoffpartialdruck der Einatemungsluft (PIO_2) aufgrund des reduzierten Luftdruckes. Dies führt umgehend zu einer Verminderung des O_2 -Partialdruckes im arteriellen Blut (PaO_2) und, wenn der Abfall des PaO_2 genug gross

ist, auch zu einer Reduktion der Sauerstoffsättigung des arteriellen Blutes ($SaO_2\%$). Diese Abnahme der SaO_2 führt bereits nach wenigen Stunden [17] zu einer erhöhten Abgabe des körpereigenen Hormons Erythropoietin (EPO) durch die Nieren. Die unmittelbare Zunahme des EPO im Blut ist dabei umso höher, je grösser die Abnahme der SaO_2 ist [26]. Dabei scheint die «Reizschwelle» für eine relevante Zunahme des EPO bei ca. 2100–2500 m zu liegen [26, 56]. Der Anstieg des EPO führt daraufhin zu einer vermehrten Neubildung von Retikulozyten und in der Folge zu einem erhöhten EV und einer erhöhten Hb_{masse} . Nun, dies ist nicht einfach per se der Fall und die Frage wird in Bezug auf Höhentrainings nach der Formel LHTH und LHTL mit Spitzenathleten kontrovers diskutiert [2, 43]. Zudem macht eine Serie von methodologischen Unterschieden (Messmethode des EV und der Hb_{masse} ; Aufenthaltsdauer und -höhe; Trainingshöhe; Eisenreserven; Gebrauch normobarer oder hypobarer Hypoxie; unterschiedliches Leistungsniveau der Athleten) als auch andere beeinflussende Faktoren, wie vor allem Krankheit und mögliche Übertrainingssymptome [27], Vergleiche schwierig. Tatsache ist aber, dass es bei einem beträchtlichen Anteil der Studien nach LHTL oder LHTH zu keiner Zunahme des EV oder der Hb_{masse} gekommen ist [2, 3, 13, 22, 29, 68, 70]. Der Vergleich mit Studien, bei welchen das EV und die Hb_{masse} nach LHTH oder LHTL erhöht war [21, 41, 45, 59, 78, 79], lässt vermuten, dass der hypoxische Reiz in den diesbezüglich nicht «erfolgreichen» Studien möglicherweise zu gering war. Entweder war die Übernachtungshöhe zu wenig hoch [13, 22, 29, 68, 70] und/oder die Aufenthaltsdauer zu kurz [2, 3]. Diese Hypothese wird durch die Resultate der Studien in *Abbildung 1* bestärkt, in welcher die Veränderung des EV oder der Hb_{masse} in Studien mit Eliteathleten nach LHTL in Relation zur Aufenthaltsdauer und Aufenthaltshöhe dargestellt ist. Diese Resultate deuten auf eine minimale Aufenthaltsdauer von 3–4 Wochen (ca. 400 Std.) auf ca. 2500 m hin, um ungefähr von einer 5%-Zunahme des EV und der Hb_{masse} profitieren zu können. Im gleichen Zusammenhang konkludierten Rusko et al. [60] mit einer minimalen hypoxischen Dosis von 3 Wochen (> 12 Std. täglich) auf 2100–2500 m. Nun, dass diese Empfehlung eher an der unteren Grenze liegt, zeigt das Resultat einer australischen Studie, bei welcher sich die Athleten während 3 Wochen (8–10 Std. pro Tag) auf 3000 m aufhielten [2] und es zu keiner Zunahme des EV und der Hb_{masse} kam. Es gibt nur eine einzige Untersuchung mit einer angenommen adäquaten hypoxischen Dosis und einer unveränderten Hb_{masse} [27]. Bei einer Gruppe von Weltklasseradfahrern war die Hb_{masse} nach 4 Wochen LHTH auf 2690 m unverändert. Da die meisten anderen erwähn-

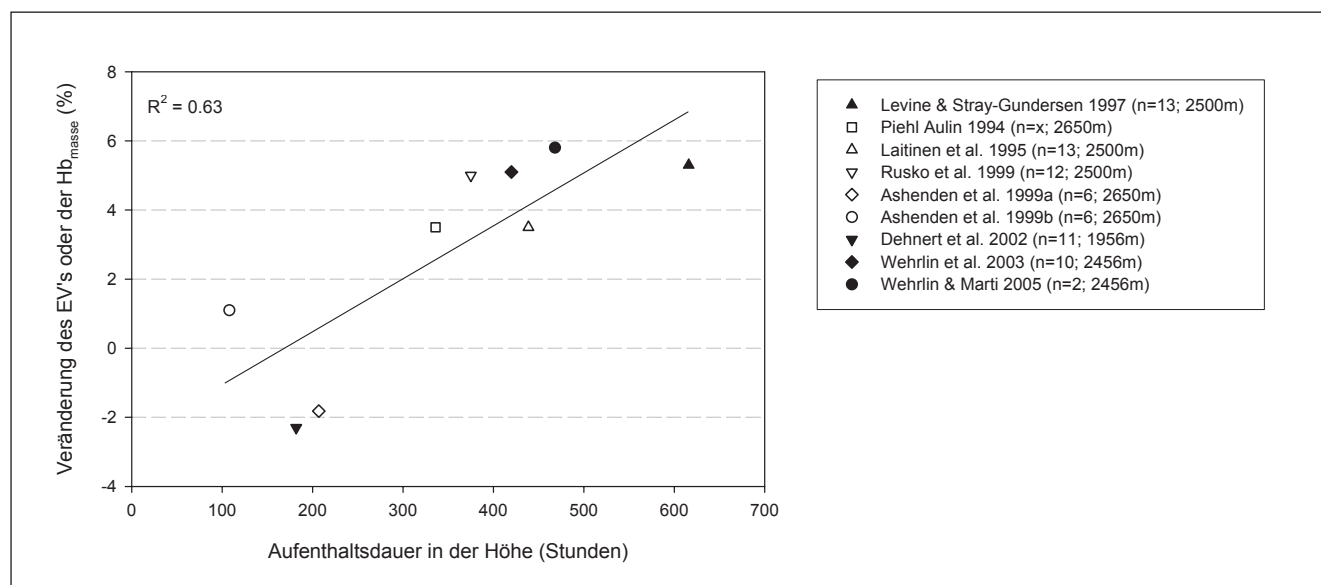


Abbildung 1: Veränderung des Erythrozytenvolumens (EV) oder der Hämoglobinmasse (Hb_{masse}) in Relation zur Aufenthaltsdauer und Aufenthaltshöhe bei Studien mit Ausdauerathleten, welche nach dem Höhentrainingskonzept «Live high – train low» durchgeführt wurden [2, 3, 13, 41, 45, 55, 59, 78, 79]. Angegeben sind zudem die Regressionslinie sowie die Erklärungsvarianz (Grafik modifiziert nach Rusko et al. 60).

ten Studien zwar trainierte, aber nicht Weltklasseausdauerathleten testeten, wurde die Hypothese aufgestellt, dass diese Athleten möglicherweise bereits ihr physiologisches Limit der Hb_{masse} erreicht hätten und es deshalb zu keiner weiteren Zunahme gekommen sei. Die Gründe hierfür sind jedoch wohl eher in ihrer «Alternativhypothese» zu suchen, nämlich dass alle Athleten in der Höhentrainingsperiode krank waren, was zu depressiven Effekten bei der Erythropoese führen kann [23]. Kürzlich konnten wir bei zwei Schweizer Weltklasseläufern mit einer ähnlich hohen Hb_{masse} beobachten, dass diese durch ein 26-tägiges LHTL (2500 und 1800 m) um ca. 6% gesteigert wurde [79]. Weiter wurde auch in Querschnittsstudien bei Ausdauerspitzenathleten von teilweise höheren Werten berichtet [35, 76].

Effekt auf das Plasmavolumen

Nebst einer Zunahme des EV und der Hb_{masse} führt die Höhenexposition bereits nach 1–2 Tagen zu einer Reduktion des Plasmavolumens [34]. Die Gründe hierfür sind noch nicht geklärt, mögliche Ursachen sind Flüssigkeitsverluste durch eine Reduktion von Plasmaproteinen [63] und durch erhöhte diuretische Prozesse [53, 64]. Dies hat zur Folge, dass sowohl der Hämatokritwert und der Hämoglobinwert bereits nach 1–2 Tagen in der Höhe erhöht sind, was zu Fehlinterpretationen bezüglich einer Zunahme des EV führen kann. Nach unseren Beobachtungen (unpubliziert) normalisiert sich das Plasmavolumen erst nach dem Höhentrainingslager wieder, wobei jedoch individuell Unterschiede feststellbar sind.

Weitere Akklimatisationseffekte des «Live high», welche die nachfolgende Leistungsfähigkeit im Flachland beeinflussen können

Wie bereits erwähnt, ist der primär wichtige Akklimatisationseffekt des «Live high» die Zunahme des EV und der Hb_{masse} . Zusätzlich beeinflussen wahrscheinlich eine Reihe eher sekundär wichtiger [80] Akklimatisationseffekte die nachfolgende Leistungsfähigkeit im Flachland. Da es nur sehr wenige Studien gibt, welche ein konsequentes LHTL-Studiendesign und Ausdauerspitzenathleten verwendeten, ist es allerdings oft schwierig zu beurteilen, ob diese Effekte durch das «Live high» und/oder ein allfälliges «Train high» erreicht wurden. Nun, Svedenhag et al. [68] zeigten in einer Gruppe von Elitelangläufern nach einem 4-wöchigen LHTH-Höhenstrainingslager auf 1900 m eine erhöhte Muskelmasse des linken Herzventrikels, was zu einer Ökonomisierung der Herzarbeit führte. Weiter zeigten Gore et al. [28] in einer kontrollierten Studie mit Spitzenathleten nach 23 Tagen LHTL (3000 m und 600 m) eine um 18% verbesserte Pufferkapazität. Nach der LHTL-Periode wurde zudem eine verbesserte mechanische Effizienz bei einem 4 x 4 Minuten dauernden submaximalen Fahrradergometertest gemessen. Im gleichen Zusammenhang zeigten Mizuno et al. [51] bei Elitelangläufern eine 6%-Zunahme der Pufferkapazität in der Wadenmuskulatur nach einem 14-tägigen LHTH-Höhenstrainingslager (leben auf 2100 m und trainieren auf 2700 m), eine 29%-Zunahme des akkumulierten Sauerstoffdefizits und eine um 17% verbesserte Laufzeit bis zur Erschöpfung auf dem Laufband. Diese korrelierte zudem mit der Zunahme der Pufferkapazität ($r = 0.91$; $p < 0.05$). Die genauen Mechanismen für die Zunahme der Pufferkapazität sind noch unklar. Mögliche Faktoren sind eine Zunahme des Kreatinphosphats und/oder erhöhte Muskelproteinkonzentrationen [51]. Eine andere Möglichkeit stellen Erhöhungen des Bikarbonats [52] und/oder der Hb_{masse} [48] im Blut dar. Eine weitere Adaptation an die Höhe ist die Zunahme des Atemminutenvolumens, welches sowohl in Ruhe als auch während der Belastung erhöht ist [50, 72] und auch nach dem Höhenaufenthalt eine gewisse Zeit erhalten bleibt. Dieses erhöhte Atemminutenvolumen ist insofern eine potentiell positive Adaptation, da dies zu einer erhöhten PaO_2 und SaO_2 führen kann [60]. Mögliche Veränderungen in der Mikrostruktur der Muskulatur durch das LHTL-Höhenstraining sind schwierig zu belegen, da es wie erwähnt keine Studien mit Spitzenathleten und konsequentem LHTL-Design zu diesem Thema gibt [80].

Ein weiterer potentieller Akklimatisationsfaktor, welcher die Leistungsfähigkeit nach dem LHTL-Höhenstraining verbessern kann, ist eine Zunahme des 2,3-Diphospho-Glyzerats (2,3-DPG), was zu einer verbesserten Sauerstoffextraktion während des Trainings nach dem Höhenaufenthalt führt [48]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es neben den positiven Effekten auf das Blut eine Reihe anderer potentieller Faktoren gibt, welche die Leistungsfähigkeit nach dem LHTL positiv beeinflussen können. Auf diesem Gebiet wären jedoch zusätzliche LHTL-Studien mit Ausdauerspitzenathleten wünschenswert.

Vergleich zwischen dem «Train high» und dem «Train low»

Ein wichtiger Nachteil der Höhe ist, dass bei länger dauernden Belastungen (> 2 Minuten) nicht mehr mit den gleichen Bewegungsgeschwindigkeiten und damit absoluten Belastungsintensitäten trainiert werden kann wie im Flachland [25]. Viele sehr gut trainierte Ausdauerathleten bewegen sich schon bei maximaler Belastung auf Meereshöhe physiologisch gesehen am «Limit», was sich typischerweise durch eine bereits stark reduzierte SaO_2 ($SaO_2 < 92\% = \text{«Exercise-induced hypoxemia»}$) bemerkbar macht [14]. Jede Reduktion des Sauerstoffpartialdruckes mit zunehmender Höhe (PIO_2) führt deshalb bei Ausdauertrainierten trotz eines höhenbedingten Anstiegs der maximalen Ventilation (VE_{max}) zu einer weiteren Reduktion der SaO_2 . Diese Reduktion der SaO_2 kann bei maximaler Belastungsintensität in der Höhe, anders als bei einer submaximalen Belastungsintensität, nicht durch einen Anstieg des Herzminutenvolumens kompensiert werden [75]. Die der $\dot{V}O_{2\text{max}}$ und die Leistungsfähigkeit nehmen mit zunehmender Höhe ab [77]. Diese Effekte sind bei Ausdauertrainierten bereits in tiefen Lagen feststellbar, so wurde bereits auf einer Höhe von 746 m (580 m Höhenunterschied) eine Reduktion der SaO_2 und $\dot{V}O_{2\text{max}}$ [30] sowie der maximalen Leistungsfähigkeit [31] gemessen. Durchschnittlich reduzieren sich die $\dot{V}O_{2\text{max}}$ und die SaO_2 bei Ausdauertrainierten in akuter Hypoxie, mit ca. 6–7% pro 1000 m zunehmender Höhe [77], wobei die individuellen Unterschiede beträchtlich sein können [7]. Mit fortschreitender Akklimatisation an die Höhe verringert sich der Leistungsverlust in der Höhe. Die Werte erreichen aber auch in moderaten Höhen die Meereshöhenwerte nicht [61]. Da die SaO_2 in der Höhe bei gleicher submaximaler Belastung reduziert ist und die gleiche absolute Belastung in der Höhe die gleiche Sauerstoffaufnahme wie im Flachland benötigt [25], können die verschlechterten Sauerstofftransportbedingungen zumindest teilweise durch einen Anstieg der Herzfrequenz kompensiert werden [75]. So erhöht sich als Beispiel bei einer Gruppe von Läufern die Herzfrequenz für die gleiche absolute Belastung von 133 Schlägen pro Minute (300 m) auf 150 Schläge pro Minute (2800 m) [75]. Die gleiche absolute Belastung stellt also in der Höhe relativ gesehen eine höhere Belastungsintensität dar. Bei Training mit gleicher Herzfrequenz ist infolgedessen die absolute Bewegungsgeschwindigkeit in der Höhe bei Ausdauersportarten, welche nicht durch hohe Bewegungsgeschwindigkeiten vom geringeren Luftwiderstand in der Höhe profitieren können (z.B. Bahnradfahrer), geringer [45]. Dies hat zur Folge, dass der mechanische und neuronale Stimulus der Muskulatur beim Training in der Höhe im Vergleich zum Training im Flachland reduziert ist [60]. Als Hinweis für einen reduzierten neuromuskulären Trainingsstimulus ist die Elektromyogram-Aktivität (iEMG) im Vergleich mit normoxischer maximaler Belastung unter chronischer [40] und akuter [54] Höhenexposition reduziert. Aufgrund der zum Teil langen Reisewege in tiefe Lagen bei der Durchführung von LHTL-Höhenstrainingslagern in Echthöhe wird oft nur das Intervalltraining in Lagen um < 1000 m absolviert. Die Trainingseinheiten mit tiefer und moderater Trainingsintensität hingegen werden in höher gelegenen (und damit weniger reiseintensiven) Lagen absolviert.

Effekte von LHTL auf die Ausdauerleistungsfähigkeit

Mehrere Studien haben bisher gezeigt, dass LHTL die $\dot{V}O_{2\max}$ und die Ausdauerleistungsfähigkeit verbessern kann [45, 46, 49, 50, 55, 57, 59, 66, 78, 79], während es bei einigen Studien zu keiner Verbesserung des Dauerleistungsvermögens kam [33, 57]. In der klassischen Studie von Levine und Stray-Gundersen [45] lebte eine Gruppe Athleten während 4 Wochen auf 2500 m, absolvierte das Grundlagentraining ebenfalls auf 2500 m und das Intervalltraining auf 1250 m (LHTL-Gruppe), eine zweite Gruppe Athleten wohnte ebenfalls während 4 Wochen auf 2500 m und absolvierte alle Trainings auf dieser Höhe (LHTH-Gruppe), während die Kontrollgruppe (LLTL) in derselben Zeitperiode auf Meereshöhe wohnte und trainierte. Im Gegensatz zur Kontrollgruppe, bei welcher $\dot{V}O_{2\max}$ nicht zunahm, war diese sowohl in der LHTH- als auch in der LHTL-Gruppe in direkter Proportion zur Zunahme des EV erhöht. Zudem waren einzig in der LHTL-Gruppe die ventilatorische Schwelle, die $\dot{V}O_{2\max}$ -Laufgeschwindigkeit und die 5000-m-Laufzeit verbessert. In einer weiteren Studie wurde das LHTL-Höhentraining mit einer Gruppe von Eliteathleten (US top 50) wiederholt [66]. Die $\dot{V}O_{2\max}$ wurde mit 3%, die 3000-m-Laufzeit mit 1.1% verbessert, wobei ein Drittel der Athleten persönliche Bestzeit lief. In einer Schweizer Studie verbesserte sich bei Mitgliedern der Orientierungslauf-Nationalmannschaft nach 24 Tagen «live high» auf 2500 m und «train low» auf 1800 m und 1000 m die $\dot{V}O_{2\max}$ mit 4.5% und die 5000-m-Laufzeit mit 1.6%, wobei auch hier die Zunahme der $\dot{V}O_{2\max}$ in Relation zur Zunahme der Hb_{masse} stand [78]. Diese positiven Resultate wurden auch in einer Fallstudie mit den zwei besten Schweizer Mittel- und Langstreckenläufern der Gegenwart, welche sich mit einem 26-tägigen LHTL-Höhen Trainingslager auf die Leichtathletik-Weltmeisterschaften 2003 in Paris vorbereiteten, beobachtet [79].

Dabei verbesserte der 5000-m-Läufer seine Bestzeit am Tag 1 nach dem LHTL-Höhen Trainingslager um über 20 Sekunden auf 13 Minuten und 12 Sekunden. Zudem liefen beide Athleten daraufhin an den Weltmeisterschaften ihre beste Rangierung an grossen Meisterschaften heraus. Das LHTL-Konzept hat auch in Studien mit künstlicher Höhensimulation (Höhenhaus) zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit geführt. Finnische Studien zeigten eine erhöhte $\dot{V}O_{2\max}$ nach 21 bis 28 Tagen «live high» (2500 m) und «train low» (Meereshöhe) [59, 55]. Im Gegensatz dazu wurde bei verschiedenen anderen Studien keine Verbesserung der $\dot{V}O_{2\max}$ und Leistungsfähigkeit festgestellt [2, 32]. Diese Resultate sind

speziell interessant, wenn man sie unter dem Gesichtspunkt der «hypoxischen Dosis» der verschiedenen Studien betrachtet. In *Abbildung 2* ist die Veränderung der $\dot{V}O_{2\max}$ durch LHTL in Studien [13, 32, 45, 46, 55, 57, 59, 66, 78] mit Eliteausdauerathleten in Relation zur Aufenthaltsdauer und -höhe aufgeführt. Wenn man von zwei Ausnahmen absieht (in der einen Studie [13] wurde von Problemen bei der $\dot{V}O_{2\max}$ -Messung sowohl am Prä- als auch am Posttest berichtet, und das Resultat stammt deswegen nur von 6 anstelle von 11 Athleten, bei der anderen Studie [33] ist möglicherweise Übertraining für die 5%-Reduktion der $\dot{V}O_{2\max}$ verantwortlich), ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der hypoxischen Dosis und der $\dot{V}O_{2\max}$. Bei den Studien, welche einen signifikanten Anstieg der Hb_{masse} oder des EV fanden, war auch die $\dot{V}O_{2\max}$ erhöht [45, 55, 59, 78], und die Veränderungen des EV [45] oder der Hb_{masse} [78] korrelierte mit der Veränderung der $\dot{V}O_{2\max}$. Weiter zeigten australische Studien positive Effekte eines 3-wöchigen LHTL-Höhen Trainingslagers auf die Arbeitsökonomie bei Eliteradfahrern [28] und Eliteläufern [62]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei richtiger Durchführung von positiven Effekten auf die aerobe Leistungsfähigkeit und die Wettkampfleistung ausgegangen werden kann.

Effekte von LHTL auf die anaerobe Leistungsfähigkeit

Es gibt nur wenige Studien, welche den Effekt von LHTL-Höhen training auf die anaerobe Leistungsfähigkeit untersucht haben. Nummela und Rusko [52] zeigten in einer kontrollierten Studie bei 400-m-Eliteläufern nach zwei Wochen «Live high» auf 2500 m mit 14–18 Std. täglich in künstlicher Höhe und «Train low» (Sprinttraining auf Meeresniveau) eine verbesserte 400-m-Laufzeit und reduzierte Laktatwerte bei submaximaler Belastung auf dem Laufband. Wie bereits erwähnt, zeigten Gore et al. [28] eine erhöhte Pufferkapazität nach 23 Nächten in einem Höhenhaus (3000 m). In einer weiteren australischen Studie zeigten Roberts et al. [57] zwar keine Veränderung des maximalen akkumulierten Sauerstoffdefizits (MAOD) und der maximal durchschnittlichen Leistungsfähigkeit während 4 Minuten auf dem Fahrradergometer ($MMPO_{4\min}$) nach 5, 10 oder 15 Tagen LHTL (8–10 Std. täglich auf 2650 m). Wenn jedoch die Daten der drei Gruppen zusammengefasst wurden, waren sowohl MAOD und $MMPO_{4\min}$ verbessert. Obwohl Levine & Stray-Gundersen keine Veränderung der MAOD nach 4 Wochen LHTL zeigen konnten [45], konkludierten Rusko et al.

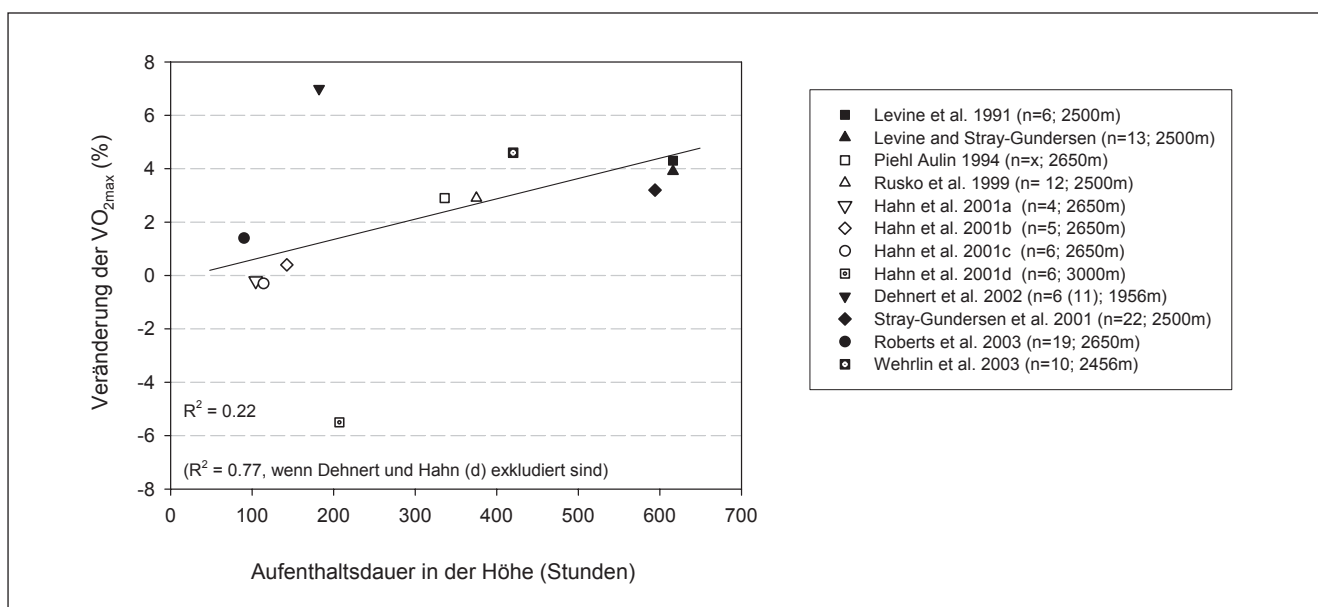


Abbildung 2: Veränderung der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$) in Relation zur Aufenthaltsdauer und Aufenthaltshöhe bei Studien mit Ausdauerathleten, welche nach dem Höhentrainingskonzept «Live high – train low» durchgeführt wurden [2, 3, 13, 41, 45, 55, 59, 78, 79]. Angegeben sind zudem die Regressionslinie sowie die Erklärungsvarianz (Grafik modifiziert nach Rusko et al. 60).

[60] in ihrem Übersichtsartikel, dass LHTL mit sprintspezifischem Training die nachfolgende anaerobe Leistungsfähigkeit im Flachland verbessern kann. Zusammenfassend muss aber festgehalten werden, dass die wissenschaftliche Evidenz für eine verbesserte anaerobe Leistungsfähigkeit nach LHTL noch eher unklar bleibt und weitere Studien wünschenswert wären.

«Responder» oder «Nonresponder»?

Obschon das Höhentrainingsmodell LHTL im Vergleich zu LHTH oder LLTL klare Vorteile bezüglich der Vorbereitung für Ausdauerwettkämpfe im Flachland gezeigt hat, bleibt wahrscheinlich eine substantielle individuelle Variabilität bestehen. Chapman, Stray-Gundersen und Levine haben ihre LHTL-Daten [45] bezüglich der individuellen «Response» der Athleten analysiert [11]. Anhand der 5000-m-Laufzeiten wurde eine Gruppe von «Respondern», welche die 5000-m-Laufzeit um mehr als den Durchschnitt verbessert hatte, und eine Gruppe von «Non-Respondern», welche eine Verschlechterung der 5000-m-Laufzeit aufwies, gebildet. Obwohl bei beiden Gruppen ein EPO-Anstieg nach 24 Std. auf 2500 m gemessen wurde, war dieser bei den «Respondern» signifikant höher (+ 52%) als bei den «Nonrespondern» (+ 34%). Zudem war die EPO-Konzentration bei den «Respondern» im Gegensatz zu den «Nonrespondern» nach 14 Tagen immer noch erhöht. Nach dem LHTL war nur das EV der «Responder» erhöht (+ 8%; «Nonresponder» + 1%). Dies führte nach der Interpretation der Autoren [11] dazu, dass es nur bei den «Respondern» zu einer Zunahme der $\dot{V}O_2\text{max}$ kam (+ 6%). Sie betonten, dass die Zunahme der $\dot{V}O_2\text{max}$ dem berechneten Resultat einer Zunahme des EV entspreche [44]. Ein weiterer Grund für die bessere «Response» der «Responder» läge in den besseren Trainingsmöglichkeiten der «Responder» in der Höhe. Diese hätten eine geringere Reduktion der Laufgeschwindigkeit sowie der Sauerstoffaufnahme in der Höhe zu verzeichnen als die «Nonresponder.» Nach Chapman, Stray-Gundersen und Levine [11] ist vor allem die unterschiedliche Reaktion der Athleten auf eben diese individuellen Differenzen bezüglich der Erythropoese und der Trainingsqualität für das unterschiedliche Abscheiden beim 5000-m-Lauf verantwortlich. Eine nachfolgende Studie bestätigte die grosse individuelle «EPO-Response» auf verschiedenen Höhen [26], doch die Suche nach genetischen Determinanten der individuellen «EPO-Response» brachte keinen Erfolg [38]. Es gibt nur eine weitere Studie, welche sich dem Thema «Responder» vs «Nonresponder» widmet. Friedmann et al. [21] zeigten kürzlich bei Elitejuniorenschwimmern nach 3 Wochen Höhenttraining (LHTH) ebenfalls beträchtliche interindividuelle Unterschiede der «EPO-Response» und der Veränderung der Hb_{masse} , welche allerdings nicht miteinander korrelierten. Auch die mittels nachfolgendem Laktatstufentest im Flachland beurteilte Veränderung der Ausdauerleistungsfähigkeit korrelierte nicht mit der Zunahme der Hb_{masse} . Leider wurde in der Studie die Reproduzierbarkeit der Hämoglobinmasse nicht gemessen, und die individuellen Daten zeigten ungewöhnlich hohe Unterschiede. Es ist daher schwierig, die interindividuelle Variation von allfälligen Messfehlern der Methode zu unterscheiden.

Eigene Beobachtungen (unpubliziert) zeigen, dass individuelle Unterschiede in der Ausprägung der Akklimatisationseffekte auf ein LHTL-Höchentrainingslager bestehen. Wenn die Athleten gruppenweise («Responder» vs. «Nonresponder») betrachtet werden, können die Funde von Chapman et al. [11] teilweise bestätigt werden. Es ist jedoch sehr schwierig, individuelle Vorhersagen zu machen, da der individuelle Output bezüglich der Hämoglobinmasse und der Leistungsfähigkeit nach dem LHTL-Höchentrainingslager durch verschiedene maskierende Faktoren, wie technische und biologische Variabilität der Messungen, Formzustand oder z.B. Krankheit und Übertraining, beeinflusst werden kann.

Praktische Aspekte des LHTL-Höhentrainings

Phasen des Höhentrainings

Bei einem Höhenttraining ist es wichtig, zum richtigen Zeitpunkt das individuell Richtige zu tun. Es gibt dafür verschiedene unterschiedliche Modelle, welche im praxisnahen Höhentrainingsbuch von R. Wilber detailliert erläutert werden [80]. Zusammengefasst ergeben sich folgende Gemeinsamkeiten:

Vor dem Höhentrainingslager

Vorbereitungsphase. Der Athlet sollte das Höhentrainingslager gut erholt, gesund sowie bereits gut austrainiert beginnen. Es macht deshalb Sinn, vor dem Höhentrainingslager 1–2 Tage zur Erholung einzuplanen. Müdigkeit und Krankheit bereits zu Beginn des Höhentrainingslagers gefährden nicht nur den Erfolg des ganzen Höhentrainingslagers, sondern können negative Auswirkungen auf den ganzen Saisonverlauf haben. Höhenttraining als Kompensator für einen schlechten Formzustand ist ebenfalls völlig deplatziert [36].

Während des Höhentrainingslagers

Ruhephase. In den ersten paar Tagen in der Höhe (z.B. 2–3 Tage; die Zahl variiert jedoch individuell und nach der Aufenthaltshöhe) sollte dem Körper Zeit gegeben werden, sich den neuen Bedingungen anzupassen. In dieser Phase sollte nur mit tiefer Intensität trainiert werden. Es folgt die **Haupttrainingsphase**. Diese besteht aus einem ersten Teil, in welchem nur mit moderater Intensität trainiert wird (ca. 5–7 Tage), sowie einem zweiten Teil, in welchem die Trainingsbelastung erhöht wird, und auch aus intensiven Trainingseinheiten mit erhöht anaeroben Anteil bestehen (ca. 14 Tage). Als generelle Regel kann gesagt werden, dass in der ersten Höhentrainingswoche in der Höhe das Trainingsvolumen verglichen mit dem Trainingsvolumen im Flachland um ca. 20% und in der 3. Woche um ca. 10% reduziert ist. Ein ähnliches Trainingsvolumen wie im Flachland ist meist erst nach 5 Wochen in der Höhe sinnvoll [80]. Die Intervalltrainingsintensität ist zu Beginn in der Höhe um ca. 5–7% und in der 3. Woche um 3–5% reduziert. Die Intervallerholungszeit ist in der ersten Höhentrainingswoche ungefähr verdoppelt und in der 3. Woche noch ca. um 50% erhöht.

Regenerationsphase. Es ist wichtig, dass der Athlet erholt ins Flachland zurückkehren kann. Es wird deshalb empfohlen, am Ende des Höhentrainingslagers 1–2 Tage zur Regeneration einzuplanen.

Nach dem Höhentrainingslager

Die Zeit und das richtige Verhalten nach dem Höhentrainingslager sind ebenso wichtig wie das richtige Verhalten während des Höhentrainingslagers selber. Als Grundmuster sei nachfolgend das «norwegische Modell» aufgeführt [80]. Es muss aber betont werden, dass dieses nur bedingt Gültigkeit hat, da jeder Athlet ein anderes optimales Muster zur Wettkampfvorbereitung nach dem Höhentrainingslager hat. Die ersten zwei Tage nach dem HTL sind eine Ruhephase. Es folgt eine ca. 8-tägige Trainingsphase, in welcher die Trainingsmenge und -intensität erhöht wird. Diese Phase wird in der Literatur oft als instabil oder als «period of poor performance» [15] bezeichnet. In dieser Zeitperiode sollten keine Wettkämpfe durchgeführt werden. In der nachfolgenden Vorwettkampfphase (5–11 Tage) sollte der Athlet eine stabile Leistungsphase mit erhöhter Leistungsfähigkeit aufweisen. In dieser Periode kann auf hohem Niveau trainiert oder es können bereits erste kurze Testwettkämpfe durchgeführt werden. Schliesslich folgt die 4–7 Tage dauernde Wettkampfphase, in welcher Höchstleistungen möglich sind. Das norwegische Modell sieht den Zeitpunkt der besten Leistungsfähigkeit ca. 16–24 Tage nach dem Höhentrainingslager. Oft werden auch die ersten 1–2 Tage nach dem Höhentrainingslager als Zeitperiode einer sehr guten Leistungsfähigkeit genannt [79]. Diese Zeit eignet sich allerdings nur, wenn lediglich ein Wettkampf durchgeführt wird. Werden an mehreren Tagen Wettkämpfe durchgeführt, fallen die darauf folgenden in die ungünstige «instabile Phase» nach dem Höhenttraining. Aufgrund der

individuellen Unterschiede (wahrscheinlich sind sie aber auch vom richtigen Verhalten während und nach dem Höhentrainingslager abhängig) wird empfohlen, vor wichtigen Wettkämpfen ein oder mehrere Höhentrainingslager durchzuführen, um das individuell richtige «Timing» herauszufinden.

Weitere trainingspezifische Herausforderungen

Der Umgang mit den veränderten Umgebungsbedingungen in der Höhe stellt für das Training eine spezielle Herausforderung dar. Es ist deshalb wichtig, dass die Trainingsbelastung und die Erholung im Einklang stehen. Mögliche Hilfen sind: Messung des Ruhepulses; Durchführung eines submaximalen Tests mit Messung der Herzfrequenz, des Blutlaktats und des subjektiven Empfindens; Durchführung von Orthostatetests usw. [60, 80]. Wertvolle Hilfen können auch psychologische Instrumente liefern [8]. Sehr wichtig ist die sorgfältige Dokumentation der Messungen und des subjektiven Empfindens in einem Trainingstagebuch, damit in der Folge von den gemachten Erfahrungen profitiert werden kann.

Medizinische Aspekte

Eisenhaushalt

Ferritin als Speicherform des Eisens ist ein notwendiger Baustein des Hämoglobins. Stray-Gundersen et al. [65] berichteten, dass es bei Ausdauerathleten mit Serum-Ferritin-Werten < 20 ng/ml bei Frauen und 30 ng/ml bei Männern im Gegensatz zu Athleten mit normalen Ferritinwerten zu keiner Zunahme des Erythrozytenvolumens nach einem 4-wöchigen Höhentrainingslager auf 2500 m kam. Es ist deshalb ratsam, die Ferritinwerte (allenfalls auch Vitamin B12 sowie die Folsäurewerte) vor dem Höhenaufenthalt zu kontrollieren.

Flüssigkeitshaushalt

Die Aufrechterhaltung des Flüssigkeitshaushaltes ist in der Höhe für die Athleten speziell wichtig. In den ersten Tagen in der Höhe besteht aufgrund des erhöhten Flüssigkeitsverlustes durch die Atmung (trockenere Luft sowie Atmung in der Höhe) und die erhöhte Urinausscheidung durch verschiedene Mechanismen die Gefahr zu dehydrieren. Eine Faustregel sagt, dass die Trinkmenge um mindestens 1 Liter per 1000 m zusätzlicher Höhe erhöht werden sollte [67]. Da es jedoch, nicht zuletzt durch die unterschiedliche Schweissrate, grosse individuelle Unterschiede gibt, ist es ratsam, täglich das Körpergewicht und die Urinkonsistenz (Farbe) zu kontrollieren. Koffeinhaltige oder andere harntreibende Getränke sollten möglichst minimiert werden.

Infektionen

Durch den Aufenthalt in der Höhe wird der Athlet einem erhöhten Stress ausgesetzt, und speziell die Atemwege sind durch die trockene Luft in der Höhe vermehrt beansprucht. Dies führt zu einer erhöhten Infektanfälligkeit während und nach der Höhentrainingsperiode [4].

Schlafstörungen

Athleten können durch den Aufenthalt in der Höhe im Schlaf gestört sein. Dies ist vor allem bei Athleten der Fall, welche sich zum ersten Mal in der Höhe aufhalten. Zunehmende Wachphasen und reduzierte Tiefschlafphasen während der Nacht treten vor allem zu Beginn des Höhenaufenthaltes auf und werden mit zunehmender Akklimatisation an die Höhe reduziert [60]. Sollten die Schlafstörungen zu stark beeinträchtigen, kann versucht werden, sich zuerst an eine tiefere Höhe zu akklimatisieren, bevor das Schlafen auf der Zielhöhe angestrebt wird.

Höhenkrankheit

Wenn Athleten Höhen über 2000–3000 m ausgesetzt sind, können vereinzelt abgeschwächte Symptome der akuten Höhenkrankheit auftreten. Die Häufigkeit und der Schweregrad sind abhängig von der Höhe, der Aufstiegsgeschwindigkeit und der individuellen Empfindlichkeit.

Konklusion

Der Nutzen einer Höhenakklimatisation (LHTH und/oder LHTL) für die Vorbereitung auf Wettkämpfe in der Höhe ist wissenschaftlich gesehen unbestritten, während die Vorteile einer Vorbereitung mittels LHTH für Wettkämpfe im Flachland kontrovers diskutiert werden. Als Wettkampfvorbereitung für einen Wettkampf im Flachland empfiehlt es sich, die Methode LHTL zu wählen, da, bei richtiger Durchführung, vom Vorteil einer erhöhten Hämoglobinmasse und wahrscheinlich auch von weiteren leistungssteigernden physiologischen Effekten in Kombination mit einem ähnlich hohen absoluten Trainingsreiz wie im Flachland und der daraus resultierenden verbesserten Leistungsfähigkeit profitiert werden kann. Die verbesserte Leistungsfähigkeit im Flachland nach LHTL ist in mehreren kontrollierten Studien mit Eliteausdauerathleten nachgewiesen worden. Folgende Faktoren können den Erfolg mindern: 1) eine ungenügende Ausprägung der Akklimatisationseffekte durch einen zu geringen hypoxischen Reiz (die ideale Aufenthaltshöhe beträgt dabei ca. 2300 bis 2500 m, kombiniert mit einer minimalen Aufenthaltsdauer von wahrscheinlich ca. 400 h, was einer LHTL-Dauer von 3–4 Wochen entspricht); 2) Probleme mit dem adäquaten Trainingsstimulus während des LHTL (Unter- oder Übertrainingssymptome); 3) das «Timing» des Wettkampfes und das Training nach dem LHTL; 4) medizinische Probleme (Atemwegserkrankungen, Infekte, Höhenkrankheitssymptome usw.); 5) eine individuell schwache «Akklimatisationsresponse» an die Höhe. Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass die Chancen gut stehen, mit einer LHTL-Vorbereitung auf Wettkämpfe im Flachland erfolgreicher zu sein als mit einer Vorbereitung im Flachland. Neben einer guten Beratung empfiehlt es sich, das LHTL nicht zum ersten Mal vor einem wichtigen Wettkampf durchzuführen, sondern bereits vorher erste Erfahrungen im Umgang mit der Höhe zu sammeln.

Dank

Für die sorgfältige Durchsicht des Artikels sei Dr. sc. nat. Urs Mäder gedankt.

Korrespondenzadresse:

Jon Peter Wehrli, Bundesamt für Sport, Eidgenössische Hochschule für Sport, 2532 Magglingen, Schweiz,
E-Mail: jon.wehrli@baspo.admin.ch;
Tel. 0041 (0)32 327 61 25; Fax 0041 (0)32 327 64 05.

Literaturverzeichnis

- 1 Adams W.C., Bernauer E.M., Dill D.B., Bomar J.B.: Effects of equivalent sea-level and altitude training on VO₂max and running performance. *J. Appl. Physiol.* 262–266, 1975.
- 2 Ashenden M.J., Gore C.J., Dobson G.P., Hahn A.G.: «Live high, train low» does not change the total haemoglobin mass of male endurance athletes sleeping at a simulated altitude of 3000 m for 23 nights. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 80: 479–484, 1999.
- 3 Ashenden M.J., Gore C.J., Martin D.T., Dobson G.P., Hahn A.G.: Effects of a 12-day «live high, train low» camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 80: 472–478, 1999.
- 4 Bailey D.M., Davies B., Romer L., Castell L., Newsholme E., Gandy G.: Implications of moderate altitude training for sea-level endurance in elite distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 78: 360–368, 1998.
- 5 Berglund B., Birgegard G., Wide L., Pihlstedt P.: Effects of blood transfusions on some hematological variables in endurance athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21: 637–642, 1989.
- 6 Berglund B., Hemmingsson P., Birgegard G.: Detection of autologous blood transfusions in cross-country skiers. *Int. J. Sports Med.* 8: 66–70, 1987.
- 7 Billat V.L., Lepretre P.M., Heubert R.P., Koralsztejn J.P., Gazeau F.P.: Influence of acute moderate hypoxia on time to exhaustion at vVO₂max in unacclimatized runners. *Int. J. Sports Med.* 24: 9–14, 2003.

- 8 Birrer D.: Einsatz psychomotorischer Instrumente in der Übertrainingsdiagnostik. *Schweiz. Z. Sportmed. Sporttraumatol.* 2: 57–61, 2004.
- 9 Burtcher M., Nachbauer W., Baumgartl P., Philadelphia M.: Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 74: 558–563, 1996.
- 10 Buskirk E.R., Kollias J., Akers R.F., Prokop E.K., Reategui E.P.: Maximal performance at altitude and on return from altitude in conditioned runners. *J. Appl. Physiol.* 23: 259–266, 1967.
- 11 Chapman R.F., Stray-Gundersen J., Levine B.D.: Individual variation in response to altitude training. *J. Appl. Physiol.* 85: 1448–1456, 1998.
- 12 Daniels J., Oldridge N.: The effects of alternate exposure to altitude and sea level on world-class middle-distance runners. *Med. Sci. Sports.* 2: 107–112, 1970.
- 13 Dehnert C., Hutler M., Liu Y., Menold E., Netzer C., Schick R., Kubanek B., Lehmann M., Boning D., Steinacker J.M.: Erythropoiesis and performance after two weeks of living high and training low in well trained triathletes. *Int. J. Sports Med.* 23: 561–566, 2002.
- 14 Dempsey J.A., Wagner P.D.: Exercise-induced arterial hypoxemia. *J. Appl. Physiol.* 87: 1997–2006, 1999.
- 15 Dick F.W.: Training at altitude in practice. *Int. J. Sports Med.* 13 Suppl. 1: S203–206, 1992.
- 16 Dill D.B., Adams W.C.: Maximal oxygen uptake at sea level and at 3,090-m altitude in high school champion runners. *J. Appl. Physiol.* 30: 854–859, 1971.
- 17 Eckardt K.U., Boutellier U., Kurtz A., Schopen M., Koller E.A., Bauer C.: Rate of erythropoietin formation in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 66: 1785–1788, 1989.
- 18 Ekblom B.T.: Blood boosting and sport. *Baillieres Best Pract. Res. Clin. Endocrinol. Metab.* 14: 89–98, 2000.
- 19 Faulkner J.A., Daniels J.T., Balke B.: Effects of training at moderate altitude on physical performance capacity. *J. Appl. Physiol.* 23: 85–89, 1967.
- 20 Faulkner J.A., Kollias J., Favour C.B., Buskirk E.R., Balke B.: Maximum aerobic capacity and running performance at altitude. *J. Appl. Physiol.* 24: 685–691, 1968.
- 21 Friedmann B., Frese F., Menold E., Kauper F., Jost J., Bartsch P.: Individual variation in the erythropoietic response to altitude training in elite junior swimmers. *Br. J. Sports Med.* 39: 148–153, 2005.
- 22 Friedmann B., Jost J., Rating T., Mairbaurl H., Bartsch P.: No increase of total red blood cell volume during three weeks of training at an altitude of 1800 m. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: S67, 1996.
- 23 Fry R.W., Morton A.R., Keast D.: Overtraining in athletes. An update. *Sports Med.* 12: 32–65, 1991.
- 24 Fulco C.S., Rock P.B., Cymerman A.: Improving athletic performance: is altitude residence or altitude training helpful? *Aviat. Space Environ. Med.* 71: 162–171, 2000.
- 25 Fulco C.S., Rock P.B., Cymerman A.: Maximal and submaximal exercise performance at altitude. *Aviat. Space Environ. Med.* 69: 793–801, 1998.
- 26 Ge R.L., Witkowski S., Zhang Y., Alfrey C., Sivieri M., Karlsen T., Resaland G.K., Harber M., Stray-Gundersen J., Levine B.D.: Determinants of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 92: 2361–2367, 2002.
- 27 Gore C.J., Hahn A.G., Rice A., Bourdon P., Lawrence S., Walsh C., Stanef T., Barnes P., Parisotto R., Martin D., Pyne D., Gore C.: Altitude training at 2690 m does not increase total haemoglobin mass or sea level VO₂max in world champion track cyclists. *J. Sci. Med. Sport* 1: 156–170, 1998.
- 28 Gore C.J., Hahn A.G., Aughey R.J., Martin D.T., Ashenden M.J., Clark S.A., Garnham A.P., Roberts A.D., Slater G.J., McKenna M.J.: Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol. Scand.* 173: 275–286, 2001.
- 29 Gore C.J., Hahn A.G., Burge C.M., Telford R.D.: VO₂max and haemoglobin mass of trained athletes during high intensity training. *Int. J. Sports Med.* 18: 477–482, 1997.
- 30 Gore C.J., Hahn A.G., Scroop G.C., Watson D.B., Norton K.I., Wood R.J., Campbell D.P., Emonson D.L.: Increased arterial desaturation in trained cyclists during maximal exercise at 580 m altitude. *J. Appl. Physiol.* 80: 2204–2210, 1996.
- 31 Gore C.J., Little S.C., Hahn A.G., Scroop G.C., Norton K.I., Bourdon P.C., Woolford S.M., Buckley J.D., Stanef T., Campbell D.P., Watson D.B., Emonson D.L.: Reduced performance of male and female athletes at 580 m altitude. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 75: 136–143, 1997.
- 32 Hahn A.G., Gore C.J.: The effect of altitude on cycling performance: a challenge to traditional concepts. *Sports Med.* 31: 533–557, 2001.
- 33 Hahn A.G., Gore C.J., Martin D.T., Ashenden M.J., Roberts A.D., Logan P.A.: An evaluation of the concept of living at moderate altitude and training at sea level. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 128: 777–789, 2001.
- 34 Heinicke K., Prommer N., Cajigal J., Viola T., Behn C., Schmidt W.: Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased hemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated erythropoietin plasma levels in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88: 535–543, 2003.
- 35 Heinicke K., Wolfarth B., Winchenbach P., Biermann B., Schmid A., Huber G., Friedmann B., Schmidt W.: Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *Int. J. Sports Med.* 22: 504–512, 2001.
- 36 Hirsch L., Klein W.: In der Höhe richtig trainieren. *Leichtathletiktraining*: 22–27, 2002.
- 37 Ingjer F., Myhre K.: Physiological effects of altitude training on elite male cross country skiers. *J. Sport Sci.* 37–47, 1992.
- 38 Jedlickova K., Stockton D.W., Chen H., Stray-Gundersen J., Witkowski S., Ge R.L., Jelinek J., Levine B.D., Prchal J.T.: Search for genetic determinants of individual variability of the erythropoietin response to high altitude. *Blood Cells Mol. Dis.* 31: 175–182, 2003.
- 39 Jensen K., Nielsen T.S., Fiskestrand J.O., Lund J.O., Christensen N.J., Secher N.H.: High-altitude training does not increase maximal oxygen uptake or work capacity at sea level in rowers. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 256–262, 1993.
- 40 Kayser B.: Nutrition and energetics of exercise at altitude. Theory and possible practical implications. *Sports Med.* 17: 309–323, 1994.
- 41 Laitinen H., Alopaeus K., Heikkinen R., Hietanen H., Mikkelsen L., Tikkanen H.O., Rusko H.: Acclimatization to living in normobaric hypoxia and training in normoxia at sea level in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27: S109, 1995.
- 42 Leigh-Smith S.: Blood boosting. *Br. J. Sports Med.* 38:99–101, 2004.
- 43 Levine B.D., Stray-Gundersen J.: The effects of altitude training are mediated primarily by acclimatization, rather than by hypoxic exercise. *Adv. Exp. Med. Biol.* 502: 75–88, 2001.
- 44 Levine B.D., Stray-Gundersen J.: The effects of altitude training are mediated primarily by acclimatization, rather than by hypoxic exercise. In: *Hypoxia: From Genes to the Bedside*. R. Roach (Ed.), New York: Kluwer Academic /Plenum Publishers, 2001, pp. 75–88.
- 45 Levine B.D., Stray-Gundersen J.: «Living high-training low»: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.* 83: 102–112, 1997.
- 46 Levine B.D., Stray-Gundersen J.: «Living high-training low»: the effect of altitude acclimatization/normoxic training in trained runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* S25, 1991.
- 47 Levine B.D., Stray-Gundersen J.: A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int. J. Sports Med.* 13 Suppl. 1: S209–212, 1992.
- 48 Mairbaurl H.: Red blood cell function in hypoxia at altitude and exercise. *Int. J. Sports Med.* 15: 51–63, 1994.
- 49 Matlina E.: Effects of physical activity and other types of stress on catecholamine metabolism in various animal species. *J. Neural. Transm.* 60: 11–18, 1984.
- 50 Mattila V., Rusko H.: Effect of living high and training low on sea level performance in cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: S156, 1996.
- 51 Mizuno M., Juel C., Bro-Rasmussen T., Mygind E., Schibye B., Rasmussen B., Saltin B.: Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J. Appl. Physiol.* 68: 496–502, 1990.
- 52 Nummela A., Rusko H.: Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *J. Sports Sci.* 18: 411–419, 2000.
- 53 Olsen N.V., Kanstrup I.L., Richalet J.P., Hansen J.M., Plazen G., Galen F.X.: Effects of acute hypoxia on renal and endocrine function at rest and during graded exercise in hydrated subjects. *J. Appl. Physiol.* 73: 2036–2043, 1992.
- 54 Peltonen J.E., Rusko H.K., Rantamäki J., Sweins K., Niittymäki S., Viitasalo J.T.: Effects of oxygen fraction in inspired air on force production and electromyogram activity during ergometer rowing. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 76: 495–503, 1997.
- 55 Piehl Aulin K.: Normobaric hypoxia: physical performance. *J. Sport Sci.* 1122, 1999.
- 56 Piehl Aulin K., Svedenhag J., Wide L., Berglund B., Saltin B.: Short-term intermittent normobaric hypoxia-haematological, physiological and mental effects. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 8: 132–137, 1998.

- 57 Roberts A.D., Clark S.A., Townsend N.E., Anderson M.E., Gore C.J., Hahn A.G.: Changes in performance, maximal oxygen uptake and maximal accumulated oxygen deficit after 5, 10 and 15 days of live high:train low altitude exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88: 390–395, 2003.
- 58 Ronsén O., Rusko H.: Special and practical issues in cross country skiing. In: *Handbook of Sports Medicine and Science – Cross country skiing*. H. Rusko (Ed.), Massachusetts, Oxford, Victoria, Berlin: Blackwell Science Ltd. 2003.
- 59 Rusko H., Tikkanen H.O., Pavolainen L., Härmäläinen K., Kalliokoski A., Puranen A.: Effect of living in hypoxia and training in normoxia on sea level VO₂max and red cell mass. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:S 86, 1999.
- 60 Rusko H.K., Tikkanen H.O., Peltonen J.E.: Altitude and endurance training. *J Sport Sci.* 22: 928–945, 2004.
- 61 Rusko H.K., Tikkanen H.O., Peltonen J.E.: Oxygen manipulation as an ergogenic aid. *Curr. Sports Med. Rep.* 2: 233–238, 2003.
- 62 Saunders P.U., Telford R.D., Pyne D.B., Cunningham R.B., Gore C.J., Hahn A.G., Hawley J.A.: Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J. Appl. Physiol.* 96: 931–937, 2004.
- 63 Sawka M.N., Convertino V.A., Eichner E.R., Schnieder S.M., Young A.J.: Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32: 332–348, 2000.
- 64 Schmidt W., Rojas J., Boning D., Bernal H., Garcia S., Garcia O.: Plasma-electrolytes in natives to hypoxia after marathon races at different altitudes. *Med Sci Sports Exerc.* 31: 1406–1413, 1999.
- 65 Stray-Gundersen J., Alexander C., Hochstein A., deLemos D., Levine B.D.: Failure of red cell volume to increase to altitude exposure in iron deficient runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: S90, 1992.
- 66 Stray-Gundersen J., Chapman R.F., Levine B.D.: «Living high-training low» altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J. Appl. Physiol.* 91: 1113–1120, 2001.
- 67 Stromme S.B., Ingjer F.: [High altitude training]. *Nord Med.* 109: 19–22, 1994.
- 68 Svedenhag J., Piehl-Aulin K., Skog C., Saltin B.: Increased left ventricular muscle mass after long-term altitude training in athletes. *Acta Physiol. Scand.* 161: 63–70, 1997.
- 69 Svedenhag J., Saltin B., Johansson C., Kaijser L.: Aerobic and anaerobic exercise capacities of elite middle-distance runners after two weeks of training at moderate altitude. *Scand. J. Med. Sci. Sports:* 205–214, 1991.
- 70 Telford R.D., Graham D., Sutton J.R., Hahn A., Campbell D.A.: Medium altitude training and sea-level performance. *Med. Sci. Sports* 28: S91, 1996.
- 71 Terrados N., Melichna J., Sylven C., Jansson E., Kaijser L.: Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 57: 203–209, 1988.
- 72 Townsend N.E., Gore C., Hahn A.G., et al.: Living high – training low increases hypoxic ventilatory response of well-trained endurance athletes. *J. Appl. Physiol.* 93: 1498–1505, 2002.
- 73 Vallier J.M., Chateau P., Guezennec C.Y.: Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 73: 471–478, 1996.
- 74 Wagner P.D.: New ideas on limitations to VO₂max. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 10–14, 2000.
- 75 Wehrli J.: Linear reduction of VO₂max from 300 to 2800m above sea level in men with a VO₂max above 60 ml/kg/min. Master Thesis. Norwegian University of Sport and Physical Education, Department of Sport Biology, Oslo, 2000.
- 76 Wehrli J., Clénin G.E., Marti B.: Erste Referenzwerte für Hämoglobinmasse und Blutvolumen bei Schweizer Spitzensportlerinnen und Spitzensportlern. Trainerherbsttagung Swiss Olympic Association. Magglingen, 2004.
- 77 Wehrli J., Hallén J.: Linear reduction of maximal oxygen uptake in acute hypoxia at simulated altitudes between 300 and 2800m above sea level in endurance trained athletes. 6th Annual Congress of the European College of Sport Sciences. Cologne, 2001.
- 78 Wehrli J., Zuest P., Clénin G.E., Hallén J., Marti B.: 24 days live high: train low increases red cell volume, running performance and VO₂max in swiss national team orienteers. 8th Annual Congress of the European College of Sport Science. Salzburg, 2003.
- 79 Wehrli J.P., Marti B.: Live high-train low associated with increased haemoglobin mass as preparation for 2003 world championships in two native european world-class runners. *Br. J. Sports Med.* (in press).
- 80 Wilber R.L.: Altitude Training and athletic performance. Campaign, IL: Human Kinetics, 2004.